

## Гидродинамический стенд

© В.П. Башурин,<sup>1</sup> И.Н. Будников,<sup>2</sup> В.А. Клевцов,<sup>2</sup> Л.В. Ктиторов,<sup>1</sup> А.С. Лазарева,<sup>1</sup>  
Е.Е. Мешков,<sup>2</sup> И.А. Новикова,<sup>2</sup> Ф.А. Плетенёв,<sup>1</sup> Я.В. Федоренко,<sup>3</sup> Г.М. Янбаев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ОАО ИТЦ „Система–Саров“, Сатис,  
607189 Саров, Нижегородская область, Россия

<sup>2</sup> Саровский физико-технический институт — филиал Национального исследовательского ядерного университета МИФИ,  
607186 Саров, Нижегородская область, Россия

<sup>3</sup> Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,  
107005 Москва, Россия  
e-mail: eemeshkov@gmail.com

(Поступило в Редакцию 12 ноября 2014 г.)

Разработана методика лабораторного моделирования двумерных течений воды в канале прямоугольного сечения. Поток создается в вертикально расположенной трубе прямоугольного сечения при вытекании воды через отверстие в днище трубы. В установке создается кратковременный (до  $\sim 15$  s) ламинарный поток воды со скоростью до  $\sim 18$  cm/s. Созданы методики регистрации скорости течения и формы потока при обтекании моделей различной формы.

Гидродинамические стенды в виде замкнутой петли для экспериментов со стационарными потоками воды обычно являются достаточно громоздкими, дорогостоящими и трудоемкими в эксплуатации сооружениями (см., например, [1]). Описанная ниже конструкция стенда свободна от таких недостатков. В данном стенде ограниченный во времени ламинарный поток воды создается в вертикально расположенной трубе при вытекании воды через отверстие в ее днище. Подобные конструкции стендов используются для исследования возможности увеличения плотности кинетической энергии потока воды при помощи различных систем направляющих устройств.

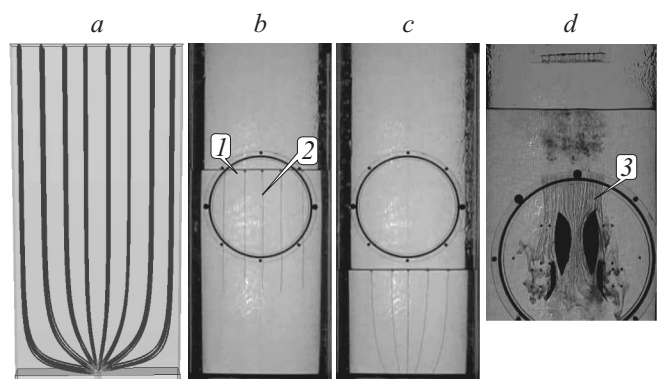
В первом варианте стенда [2] для проведения экспериментального моделирования работы осесимметричных кумулирующих устройств использовалась вертикально расположенная цилиндрическая стеклянная труба диаметром 18 см и высотой 1 м. При вытекании воды через сливное отверстие диаметром 4 см в трубе создавался ламинарный поток воды со скоростью до  $\sim 10$  cm/s и длительностью несколько секунд.

Для экспериментов с плоским ускорителем потока был разработан второй вариант стенда [3,4] с прямоугольным сечением канала измерительной секции  $36 \times 6$  см и высотой 1 м. Измерительная секция стенда выполнена в виде плоского сосуда, склеенного из оргстекла и смонтированного на металлической подставке. Передняя стенка сосуда является съемной. В этой стенке имеется отверстие со съемным окном, на внутренней поверхности которого может устанавливаться исследуемая модель. Прозрачность стенок сосуда позволяет производить видеосъемку течения и обтекания модели.

На рис. 1 приведены результаты: расчета траектории течения элементарных струй воды в стенде по программе STAR CCM + (рис. 1, *a*) и эксперимента (рис. 1, *b, c*). В этом эксперименте течение в стенде (без установленной модели) визуализируется отрезками ниток, поддерживаемыми на плаву микроплавками из

пенопласта. В начальной и средней стадиях течения вертикально расположенные (под действием силы тяжести) нити опускаются вместе с водой, не меняя формы. Таким способом, подтверждается одномерный и ламинарный характер течения в верхней (большей) части стенда. Отклонения от одномерного течения возникают только в зоне сливного отверстия примерно в 10 см от дна.

Разработан и другой метод визуализации течения в стенде (рис. 1, *d*) при помощи струек, окрашиваемых марганцевокислым калием. Ряд кристаллов калия при их погружении в воду практически сразу же начинают растворяться в ней, образуя окрашенное облачко. Поскольку плотность такого раствора несколько выше плотности воды, облачко сразу же начинает медленно



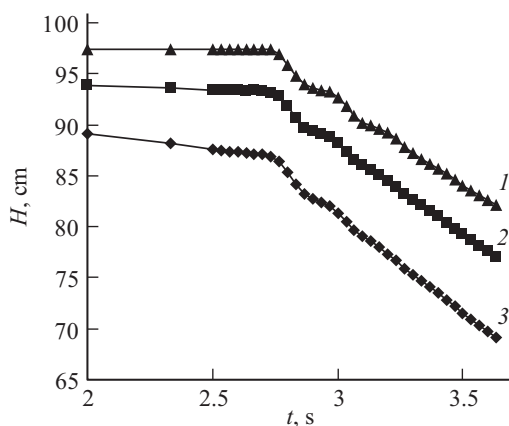
**Рис. 1.** Картина течения в стенде с каналом прямоугольного сечения. Линии тока в измерительной секции стенда демонстрируют одномерный и ламинарный характеры течения в зоне выше 20 см над сливным отверстием: *a* — расчет по программе STAR CCM +; *b, c* — эксперимент, течение визуализируется нитками, удерживаемыми на плаву микроплавками; *d* — визуализация течения вблизи плоской модели ускорителя потока при помощи струек, окрашенных марганцевокислым калием. 1 — съемное окно, 2 — нитки, 3 — струйки, окрашенные марганцевокислым калием.

погружаться, формируя окрашенные струйки. В наших опытах такие струйки создавались до начала течения в стенде, и, когда они достигали нужной длины, запускалось течение в стенде. Это течение увлекает струйки, и их деформация отслеживает картину течения вблизи исследуемой модели, в данном случае плоского варианта ускорителя потока. Скорость потока в области одномерного течения уменьшается со временем по мере снижения уровня воды, но в каждый момент времени эта скорость практически одинакова во всех точках этой области в силу высокой скорости звука в воде по сравнению со скоростью течения. В установке создается кратковременный (до  $\sim 15$  s) ламинарный поток воды со скоростью до  $\sim 18$  cm/s.

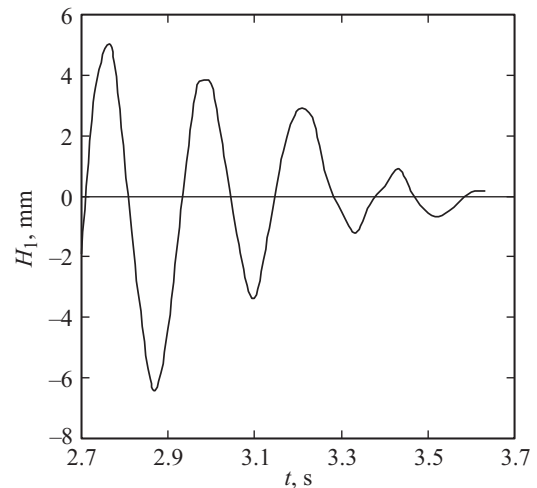
Скорость течения воды в измерительной секции стенда определялась при помощи маркеров потока в виде сферических частиц (диаметром 1–3 mm) из полистирола ( $\rho = 1.05 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ). Как показывает опыт, сферические частицы из полистирола диаметром 1–3 mm погружаются в воде с постоянной скоростью, которая зависит от диаметра частицы.

На рис. 2 приведены результаты измерений  $H(t)$  уровня воды и двух частиц в зависимости от времени. Эти зависимости иллюстрируют изменение со временем уровня воды и процессы погружения частиц в воде. В покоящейся воде ( $t \leq 2.7$  s) частицы полистирола погружаются с постоянными, хотя и различающимися скоростями, что связано с некоторым различием их размеров. Экспериментально установлено, что течение воды в измерительной секции после удаления пробки из сливного отверстия на начальном этапе ( $t > 2.7$  s) носит колебательный характер (длительность около 1 s), что отражается как на зависимости  $H(t)$  уровня воды, так и на положении частиц. Зависимость  $H_1(t)$  уровня воды в интервале времени  $2.7 < t < 3.7$  s хорошо аппроксимируется полиномом второй степени  $H_{1\text{pol}}(t)$ .

На рис. 3 приведена зависимость  $H_1(t)$ , которая иллюстрирует затухающие колебания уровня воды (и соответственно скорости потока в стенде) в течение  $\sim 1$  s после



**Рис. 2.**  $H(t)$  диаграмма положения уровня воды (1) и двух частиц (2,3) полистирола (диаметр  $\sim 2$  mm) до и после начала течения в измерительной секции. До момента времени  $t = 2.75$  s вода в стенде покоится.



**Рис. 3.** Затухание колебаний уровня воды в начальной стадии истечения из измерительной секции.

начала слива. Колебательный характер течения в начальной стадии позволяет оценить погрешность, с которой частицы полистирола диаметром  $\sim 2$  mm отслеживают течение в стенде. Оценки, основанные на сравнении значений зарегистрированных зависимостей  $H_1(t)$  для уровня воды и  $H_2(t)$ ,  $H_3(t)$ , для частиц с полученным путем аппроксимации в подобных опытах, показывают, что различие их величин составляет  $\sim 1.5$  mm.

Таким образом, в настоящей работе описана конструкция компактного стенда, в котором в вертикально расположенной трубе создается ограниченный во времени поток воды, возникающий при сливе воды через отверстие в ее днище. В численных расчетах и экспериментально подтверждены ламинарность и однородность возникающего течения. Разработаны методы: измерения скорости потока воды при помощи маркеров из частиц полистирола, визуализации потока.

## Список литературы

- [1] Базаров Ю.Б., Богуненко Ю.Д., Бондаренко Г.А., Вишневецкий Е.Д., Кунин А.В., Логвинов А.И., Мешков Е.Е., Никитин И.Н., Попов М.С., Рябов А.А., Семенов Ю.К., Стародубцев В.А., Стаценко В.П., Tzanos C.P., Dzodzo M.B. // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Теор. и прикл. физика. Вып. 1–2. 2010. С. 48–59.
- [2] Башурин В.П., Каныгин Р.И., Кошелева Е.Ю., Мешков Е.Е., Новикова И.А., Плетенев Ф.А., Щепелев А.А. Расчетное и лабораторное моделирование кумуляции в ламинарном гидродинамическом потоке. XIV Междунар. школа-семинар. Модели и методы аэродинамики. Евпатория. 4–13. 2014. С. 24–25.
- [3] Bashurin V.P., Budnikov I.N., Klevtsov V.A., Ktirov L.V., Lazareva A.S., Meshkov E.E., Novikova I.A., Pletenev F.A., Hatunkin V.Y., Yanbaev G.M. // Abstracts of Turbulent Mixing and Beyond Workshop. 2014. Italy: Trieste, 2014. P. 60.
- [4] Bashurin V.P., Begunov N.A., Budnikov I.N., Klevtsov V.A., Ktirov L.V., Lazareva A.S., Meshkov E.E., Novikova I.A., Pletenev F.A. // Abstracts of Turbulent Mixing and Beyond Workshop. 2014. Italy: Trieste. 2014. P. 81.